

Геоэкология

УДК 551.510.535:551.501.8

ВАРИАЦИИ КОМПОНЕНТ РАДИАЦИОННОГО ФОНА В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНОМ И СПОКОЙНОМ РЕГИОНАХ (ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ)

А.В. Вуколов¹, И.И. Ипполитов^{1,2}, В.Д. Каратаев¹, П.М. Нагорский^{1,2}, С.В. Смирнов^{1,2}, П.П. Фирстов, В.С. Яковлева¹

¹Томский политехнический университет

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

E-mail: vukolov@tpu.ru

Представлены предварительные результаты скоординированных экспериментов по изучению взаимной связи между компонентами естественного радиационного фона и метеорологических величин в сейсмически активном и пассивном районах. Выявлены принципиальные отличия в согласованности вариаций β -, γ -излучений на временных интервалах от синоптического до годового в сейсмически спокойном и активном регионах.

Ключевые слова:

Радон, торон, продукт распада, активность, радиоактивное равновесие, метеорологическая величина, приземная атмосфера.

Key words:

Radon, thoron, decay product, activity, radioactive equilibrium, meteorological value, ground atmosphere.

Введение

Интерес к вариациям уровня естественного радиационного фона вызван необходимостью оценки ионизирующей радиации в физике приземного слоя атмосферы, радиоэкологии, сейсмологии. Процессы обмена почвенного воздуха и его составляющих с приземной атмосферой приводят к выносу в приземный слой атмосферы почвенных газов, в том числе радона, и к поступлению в почву атмосферных газов. Помимо геологических процессов, приводящих к изменению плотности потока ионизирующей радиации с поверхности грунта, факторами, управляющими скоростью и направлением газового обмена между почвой и приземной атмосферой, являются вариации температур поверхностного слоя почвы и приземного слоя атмосферы, атмосферного давления, влажности, солнечной радиации, скорости и направления ветра. Совместное воздействие перечисленных факторов сложным образом влияют на вариации ионизирующей радиации.

1. Современное состояние исследований

На основании суммирования накопленного мирового банка данных по временным рядам вариаций уровня радиоактивности приземной атмосферы, выявлено влияние следующих факторов на их временную динамику — метеорологических процессов, астрономических явлений и изменений в литосфере. Отметим, что основным направлением исследований динамики уровня радиоактивности приземного слоя атмосферы до сих пор является искусственная радиоактивность, вызванная испытаниями ядерного оружия, техногенными авариями и технологическими процессами. Вариациям характеристик полей ионизирующих излучений естественного происхождения уделяется значительно меньше внимания, хотя природная радиоактивность и её вариации существовали всегда. Поэтому совершенно справедливо в работе [1] подчеркнуто: «...необходимость пересмотра существующей ситуации, когда единственным критери-

ем радоноопасности является плотность потока радона с поверхности почв, измеренная «мгновенно» в случайный момент времени, признается уже практически всеми».

Возникающие в литосфере зоны растяжений и сжатий, приводят к изменению интенсивности потоков газов (в том числе и радона) из земных недр в атмосферу. Таким образом, вариации потока ионизирующей радиации являются индикатором изменения напряжений в литосфере и могут быть использованы в качестве предвестника землетрясений. Поэтому, основные исследования (мониторинг) временных вариаций ионизирующей радиации ведутся в районах с высокой сейсмической активностью [2–4].

Регистрация и последующий анализ полей ионизирующих излучений в атмосфере проводится, как правило, только по одному виду излучений (альфа, бета, гамма, либо нейтронное) или по одному типу радионуклида (как правило – радону). В метеорологических исследованиях приземного слоя атмосферы регистрируется набор стандартных метеовеличин с весьма большим временным тактом (3 ч и более). Помимо стандартных метеовеличин регистрируется дополнительный набор метеорологических данных. Отдельными экспериментами регистрировались: вертикальные потоки импульсов тепловой энергии; составляющие ветра, давления и температуры; параметр турбулентности приземного слоя. Были также проведены измерения уровня приходящей солнечной радиации в видимом и ультрафиолетовом диапазонах и электро-

физические параметры приземного слоя. Регистрация радиоактивной составляющей приземной атмосферы в таких экспериментах, как правило, не ведётся. В пограничном слое атмосферы дочерние продукты распада торона и радона являются центрами формирования аэроэлектрических структур, эволюция которых приводит, в конечном итоге, к изменению режима облачности, и, в долгосрочной перспективе, к изменениям климата [5–7].

В сейсмически опасных районах на пространственно-временные вариации плотности потока ионизирующих излучений, связанные с изменением напряжений в литосфере, накладываются «фоновые» вариации, обусловленные метеорологическими и иными причинами, не связанными с процессами подготовки землетрясений. С точки зрения выявления предвестников землетрясений эти «фоновые» вариации представляют собой помехи, спектр которых и факторы, управляющие ими, – слабо изучены. Таким образом, возникла проблема сравнительной оценки спектрально-временных параметров «фоновых» вариаций β -, γ -радиации и выявления их взаимных связей с метеорологическими и атмосферно-электрическими величинами приземного слоя.

2. Техническое оснащение и методология мониторинга

Пункт скоординированного мониторинга расположен в г. Томске и включает в себя оборудование для непрерывных автоматизированных измерений физических полей: β -, γ -излучения, давление,

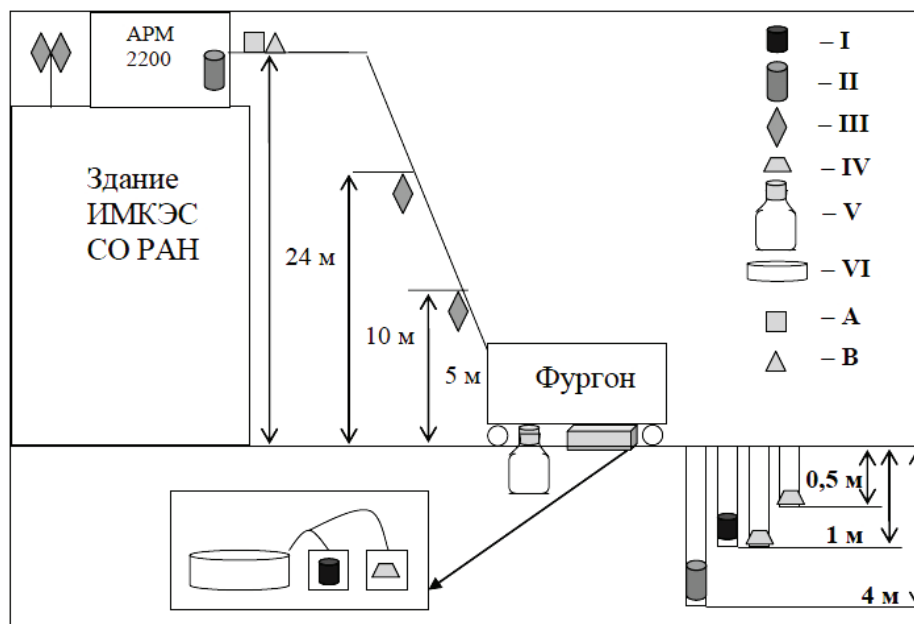


Рис. 1. Схема размещения датчиков ИМКЭС–ТПУ на экспериментальной площадке ИМКЭС: А – метео- и актинометрические датчики; В – датчики электрических параметров; I) сцинтилляционный α -детектор ZnS; II) сцинтилляционный γ -детектор NaI (TI); III) газоразрядный счетчик β -излучения ТС-6; IV) торцевой счетчик β -излучения СБТ-10; V) полупроводниковый коаксиальный германиевый детектор ДГДК-100В γ -излучения с чувствительностью 100 м², установленный в сосуд Дьюара; VI) – автоматизированная накопительная камера для измерения ППР; АРМ 2200 – радиометр радона (SA-RAD GmbH, Germany)

температуры, влажности, суммарной радиации, напряжённости электрического поля, электропроводности атмосферы, характеристик атмосферной турбулентности, общего содержания озона.

Мониторинг атмосферно-электрических, метеорологических и актинометрических величин (температура приземного слоя атмосферы T , давление p , относительная влажность, скорость и направление ветра температура поверхности и подповерхностные температуры на серии глубин) проводится с помощью автоматизированной информационно-измерительной системы. В её состав включены измерители напряжённости электрического поля атмосферы «Поле-2», полярных электропроводностей атмосферного воздуха «Электропроводность-2» и уровня γ -фона. Приходящая солнечная радиация измеряется пиранометром Kipp&Zonen CM-11 и фотометром NILU-UV-6T.

В 2006 г. измерения велись на стандартной метеоплощадке. Начиная с марта 2007 г. измерения перенесены на специально оборудованную наблюдательную площадку, расположенную на мезонине корпуса ИМКЭС СО РАН на высоте 24 м. Детектор мощности дозы γ -излучения на основе газоразрядных счетчиков расположен внутри помещения, которое находится непосредственно под измерительной площадкой. Такт съема данных до октября 2007 г. составлял 1 мин, а с октября 2007 г. уменьшен до 30 с. Параллельно, измерения основных метеопараметров и характеристик турбулентности с тактом в 1 мин ведутся с помощью двух ультразвуковых метеостанций АМК-3 [8].

Для анализа влияния приземного слоя атмосферы на потоки радона и торона с поверхности земли, распределение радона, торона и дочерних

продуктов их распада [9], а также создаваемых ими потоков ионизирующих излучений по высоте разработана и апробирована методика проведения мониторинга характеристик радонового поля, потоков ионизирующих излучений, метеорологических и атмосферно-электрических параметров. Детальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Площадка для измерений расположена на территории Института метеорологических климатических экологических систем (ИМКЭС) г. Томск. Вторая площадка расположена на территории п. Паратунка Института вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, рис. 2, а.

На рис. 2, б показана схема тектонического строения полуострова Камчатка и помечено местоположение станции мониторинга. На карте обозначены районы: 1 – кайнозойские осадочные толщи; 2 – выступы вулканогенно-осадочных и кремнисто-вулканогенных толщ островных дуг и окраинных морей; 3 – Западно-Камчатско-Корякский окраинно-континентальный вулканический пояс; 4 – Центрально-Камчатская зона (вулканогенные, кремнисто-вулканогенные и вулканогенно-осадочные толщи островных дуг и окраинных морей); 5 – выступы метаморфических пород; 6 – лесновские и хозгонские флишевые толщи; 7 – Центрально-Камчатский прогиб; 8 – Восточно-Камчатская зона; 9 – Тюшевский прогиб; 10 – зона террейнов восточных полуостровов Камчатки; 11 – Центрально-Камчатский вулканический пояс; 12 – Восточно-Камчатский вулканический пояс; 13 – разрывные нарушения: а – надвиги, б – субвертикальные. Цифрами на схеме обозначены: 1–2 районы Пенжинский, Паланский; 3 – полуостров Омгон; 4 –

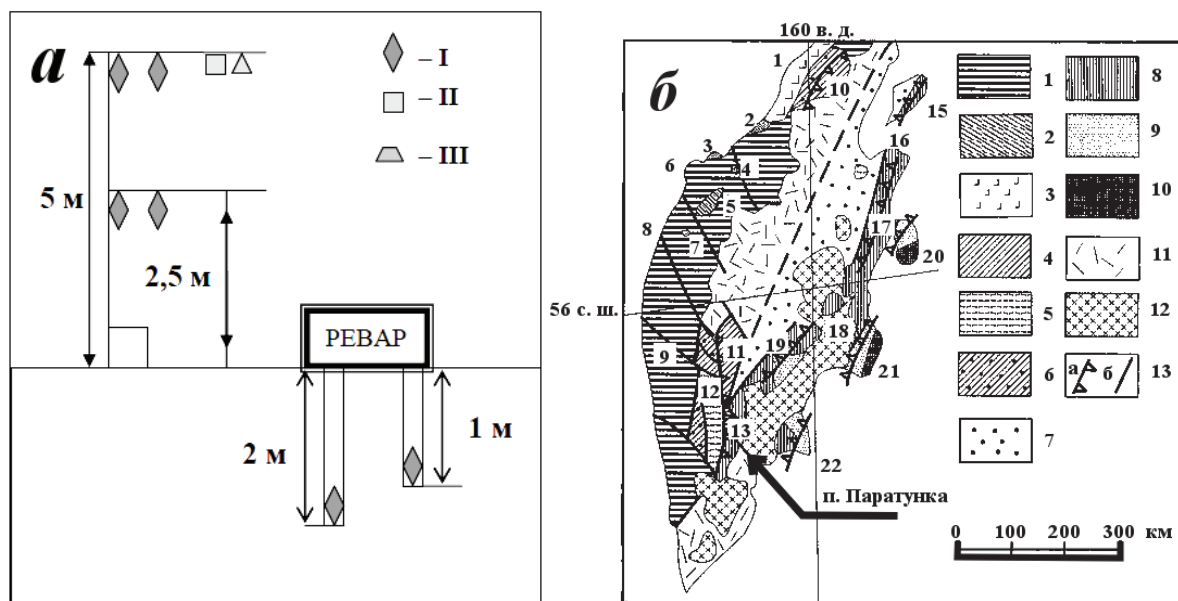


Рис. 2. Экспериментальная площадка. а) схема размещения датчиков Паратунка, Камчатка-ТПУ на экспериментальной площадке Института вулканической геологии и геохимии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский: I) газоразрядный счетчик β -излучения СТС-6; II) метео- и актинометрические датчики; III) торцевой счетчик β -излучения СБТ-10. б) схема тектонического строения полуострова Камчатка, стрелкой обозначено местоположение станции мониторинга

бассейн река Рассошина; 5 – система хребтов Кылымс-Медвежий-Пенсантайн; 6 – полуостров Ут-холок; 7 – бассейн река Тихая; 8 – мыс Хайрюзова; 9 – Колпаковский район; 10 – Камчатский перешеек; 11 – юг Срединного хребта; 12–14 – Малкинский, Ганальский и Хавывенский выступы метаморфических пород; 15 – остров Карагинский; 16 – полуостров Озерной; 17–19 хребет Кумроч, Тумрок, Валагинский; 20–22 полуострова Камчатский мыс, Кроноцкий, Шипунский.

Согласно схеме рис. 1 дополнительно предполагается вести параллельный мониторинг потоков α -, β -, γ -излучений на высоте 25 м в приземном слое атмосферы и на глубине 1 м в подпочвенном слое. Вертикальное распределение потока β -излучения планируется изучать как по высоте (в воздухе – 5, 10 и 25 м), так и по глубине (на 0,5 и 1 м в почве). На высоте 25 м в стандартной метеобудке расположены: сцинтилляционный NaI (Тl) детектор, регистрирующий поток γ -излучения; два газоразрядных счетчика β -излучения (тип СТС-6), такт схема данных с которых составляет 2 мин.

Непосредственно на поверхности земли размещены γ -спектрометр на основе полупроводникового коаксиального германиевого детектора ДГДК–100В, который позволит производить разделение сигналов на вариативную (γ -излучающие продукты распада радона и торона) и стационарную (почвенные радионуклиды) компоненты, а также автоматизированный комплекс для непрерывных измерений плотности потока радона и торона с поверхности земли. При промерзании почвы и/или наличии на поверхности почвы льда радинообмен между почвой и атмосферой затруднен: радон в почвенном воздухе на небольших глубинах начинает накапливаться, и его активность – достигать равновесного значения. Для учета этого фактора, а также оценки временных колебаний температуры активного слоя почвы и связанных с этим вариаций конвективного газообмена с атмосфе-

рой, запланировано размещение резисторных температурных датчиков на поверхности почвы и на серии глубин (до 4 м). Для анализа динамики объемной активности почвенного радона и торона, невозмущенную изменением метеоусловий, предполагается установка сцинтилляционного NaI (Тl) детектора на глубине 5 м.

После анализа первых результатов многофакторного эксперимента, было решено усложнить схему эксперимента, добавив 6 газоразрядных счетчиков к имеющимся, согласно схеме, на рис. 3, а. В итоге, созданная линейка счетчиков, в дополнение к имеющимся на мезонине здания ИМКЭС, позволяет детально изучать вертикальное распределение плотности потоков β -, γ -излучений и МЭД γ -излучения до высоты 25 м. Схема исследования распределения полей ионизирующих излучений на модернизированной экспериментальной площадке представлена на рис. 3, б.

На Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне в 1997–2002 гг. была создана сеть пунктов мониторинга подпочвенного радона с целью прогноза сильных землетрясений Авачинского залива [2, 3]. Регистрация подпочвенного радона с ноября 1999 г. ведется радиометрами «РЕВАР», в которых используется пассивный (без пробоотбора) способ измерения β -излучения продуктов распада радона газоразрядными счетчиками (СТС-6, СБМ-19). Счетчики устанавливались в заборных емкостях (оцинкованное ведро) объемом 10 л, которые закапывались на глубину 1 или 2 м. Накапливаемые данные с частотой дискретизации 6 цикл/ч сохраняются в сменном модуле энергонезависимого запоминающего устройства и затем переносятся в ПК через последовательный порт RS-232. Переход к размерности объемной активности (Бк/м³) осуществлялся на основании эмпирических соотношений, полученных после одновременных измерений эталонным радиометром РРА-01-03М и «РЕВАР». Вблизи здания Института вул-

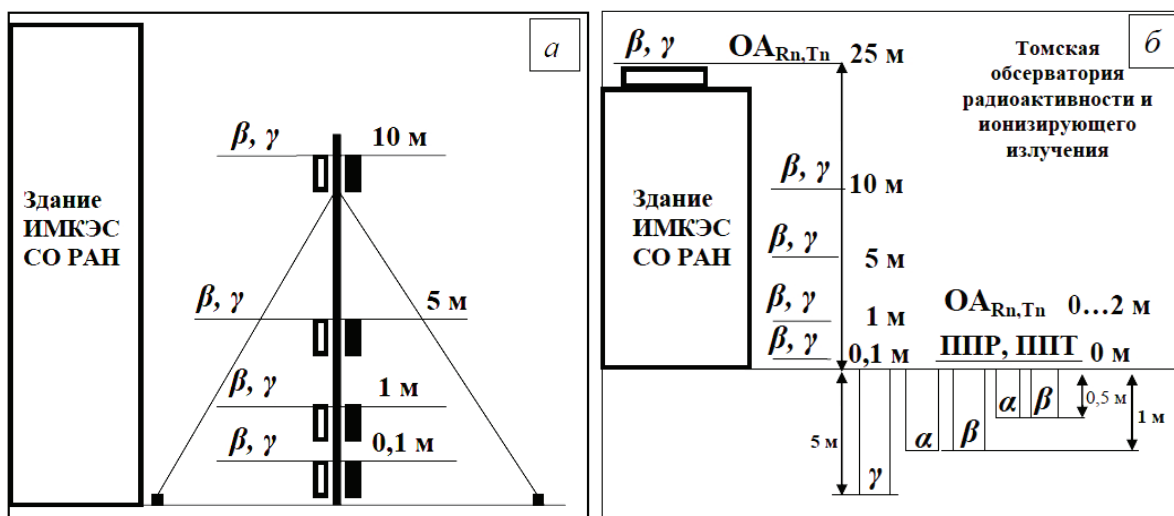


Рис. 3. Схема измерения характеристик полей ионизирующих излучений, радона и торона

канологии и сейсмологии ДВО РАН (ИНС1) на базе скважины глубиной 350 м в подземном бункере расположен опорный пункт. Схема расположения аппаратуры в этом пункте приведена в [3, 9].

Дополнительно для осуществления многофакторного скоординированного эксперимента на Петропавловск-Камчатском геодинатическом полигоне с начала 2009 г. проведена модернизация измерительного комплекса. В результате производится мониторинг потоков β -, γ -излучений на высотах 2,5 и 5 м в приземном слое атмосферы (рис. 1, 2).

Результаты скоординированных экспериментов дополняются текущими данными о космической погоде, распространяемых открыто в сети INTERNET (поток солнечного радиоизлучения, числа Вольфа, индексы геомагнитной активности, интенсивность потока космических лучей и т. д.). Более подробное описание аппаратного и методического обеспечения мониторинга представлено в [9].

3. Сезонные вариации составляющих радиационного фона в сейсмически пассивном регионе

Предварительный анализ данных мониторинга позволил установить, что в рядах данных мониторинга существуют вариации с периодами от единиц минут до года. Например, на временных масштабах от синоптического до годового вариации γ -фона оказываются связанными с изменениями атмосферного давления (уменьшение атмосферного давления приводит к росту уровня γ -фона и наоборот). Вариации с масштабом 2 сут и менее, связаны с внутрисуточными вариациями и отдельными выбросами. Вариации, с длительностью от 2 до 7–10 сут., относятся к синоптическому масштабу метеорологических явлений.

Исходные ряды данных были пропущены через 2 фильтра низких частот (ФНЧ) с верхними частота-

ми среза, равными $(2 \text{ сут})^{-1}$ и $(3 \text{ ч})^{-1}$, а также через полосовой фильтр с интервалом периодов: 2 ч – 2 сут.

В целом, в летних условиях вариации γ -фона с суточным периодом выражены слабо по сравнению с аналогичными вариациями β -фона, однако существуют интервалы, когда они проявляются достаточно ярко. Не менее сложной оказывается временная динамика вариаций β -компоненты. Вариации β -фона оказываются сравнительно слабо связанными с вариациями атмосферного давления синоптического масштаба и тесно связанными с суточными вариациями полярных электропроводностей атмосферы, её температуры, плотности и давления водяного пара. Таким образом, оказалось, что вариации γ -, β -излучений слабо связаны между собой, однако на отдельных периодах синоптического масштаба связь между вариациями γ -, β -излучений может быть весьма высокой [10, 11].

Перейдем к анализу данных мониторинга на годовом масштабе. В годовом цикле временные вариации β -, γ -излучений в г. Томске, иллюстрируются рис. 4. Представлены панели: а) β -фон (24 м), $1/\text{м}^2\text{с}$; б) γ -фон внутри помещения (24 м), $1/\text{м}^2\text{с}$; в) атмосферное давление, ГПа; г) температура атмосферного воздуха, $^{\circ}\text{C}$. Данные представлены за период с III квартала 2009 г. по II квартал 2011 г. Таким образом, на годовом интервале вариации β -, γ -излучения находятся фактически в противофазе с сезонными изменениями атмосферного давления. Но хорошо совпадает, с небольшим (в пределах 1–2 мес.) сдвигом по фазе, с температурной вариацией атмосферного воздуха. Вместе с тем, как видно из рис. 4, существует небольшой (в пределах 1–2 мес.) сдвиг по фазе в годовом цикле между вариациями уровня β -, γ -фона.

Отметим, что механизм воздействия ионизирующих излучений естественного происхождения

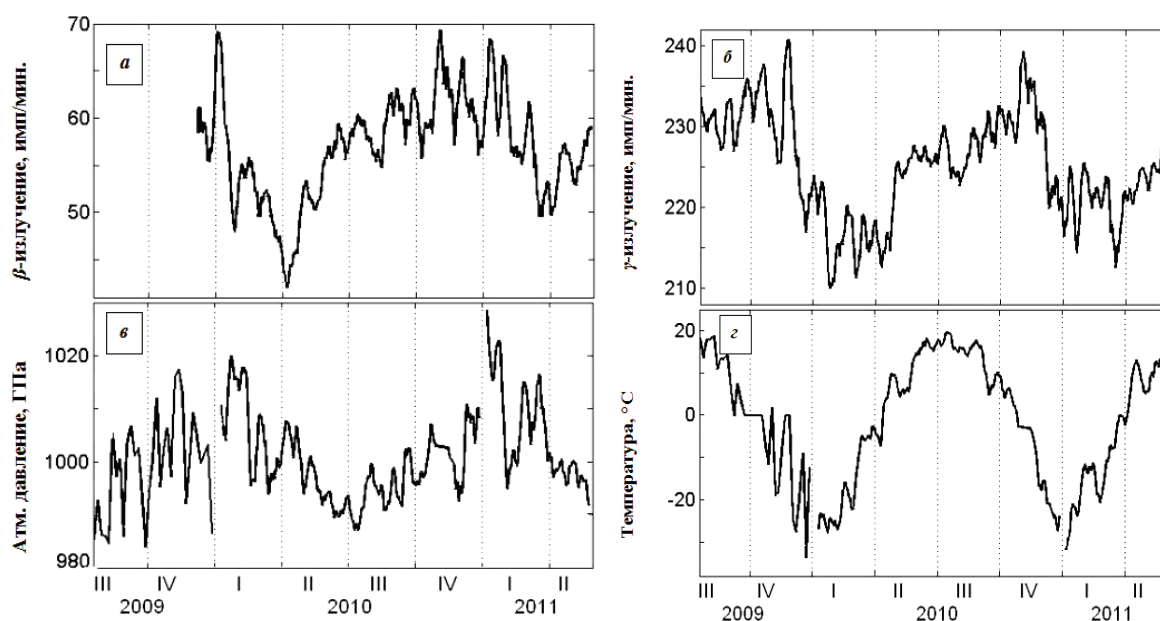


Рис. 4. Вариации основных компонент радиационного фона на годовом интервале в сейсмически спокойном регионе

на окружающую среду определяется видом излучения. Поток β -частиц способны проходить в воздухе расстояние от десятков см до нескольких метров, в зависимости от их энергии, в биологических тканях величина пробега этих частиц лежит в пределах от долей до единиц см. Поток фотонов γ -излучения обладает высокой проникающей способностью, и в воздухе может проходить расстояния более 1 км. В приземной атмосфере β -, γ -фон обусловлен одними и теми же источниками: почвенными радионуклидами и атмосферными продуктами распада радона и торона.

4. Сезонные вариации составляющих радиационного фона в сейсмически активном регионе

Проведем анализ данных мониторинга на годовом временном масштабе, полученных в сейсмически активном регионе. Годовой ход отдельных составляющих радиационного фона и основных метеовеличин иллюстрируются рис. 5. Представлены панели: 1) β -фон (высота датчика — 5 м пунктирная линия, 2,5 м — сплошная), 1/м²с; 2) γ -фон (5 м — пунктирная линия, 2,5 м — сплошная), 1/м²с; 3) атмосферное давление, гПа; 4) температура атмосферы. Данные представлены за период с III квартала 2009 г. по II квартал 2011 г. Для удаления вариаций суточного и внутрисуточного масштабов исходные ряды компонент радиационного фона были пропущены через фильтр низких частот с верхней частотой среза, равной (2 сут)⁻¹. Ряды метеоданных были пропущены через 2 ФНЧ с верхними частотами среза, равными (2 сут)⁻¹ и (3 ч)⁻¹.

Как следует из анализа данных мониторинга на годовом интервале, вариации γ -излучений

на обеих высотах находятся фактически на постоянном уровне до перехода температуры атмосферы к отрицательным значениям. После этого начинается плавное, фактически линейное, уменьшение уровня γ -фона вплоть до того момента, когда температура не станет положительной. Такое поведение γ -фона на годовом интервале очевидно связано с промерзанием почвы при отрицательных температурах и блокированием выхода почвенного радона в приземную атмосферу.

Явной связи γ -фона с сезонными изменениями атмосферного давления за анализируемый интервал выявлено не было, что, по-видимому, обусловлено малой амплитудой колебаний давления в данном годовом цикле.

Обратимся к анализу временной динамики вариаций β -компоненты. В вариациях β -фона выделяются 2 максимума, которые приходятся на осеннее и весеннее равноденствие, и 2 минимума — глобальный и локальный. Глобальный минимум регистрируется в летнее время, а локальный — во время зимнего солнцестояния. На большей высоте локальный минимум выражен более ярко. В периоды равноденствия возрастает также размах флуктуаций уровня β -фона. Выявленные особенности временной динамики β -фона в сейсмически активном регионе с морским климатом резко контрастируют как с поведением γ -фона в том же регионе, так и с поведением β -, γ -излучений в сейсмически спокойном регионе с резко континентальным типом климата. Выяснение причин такого различия в поведении основных составляющих радиационного фона естественного происхождения — тема отдельного исследования.

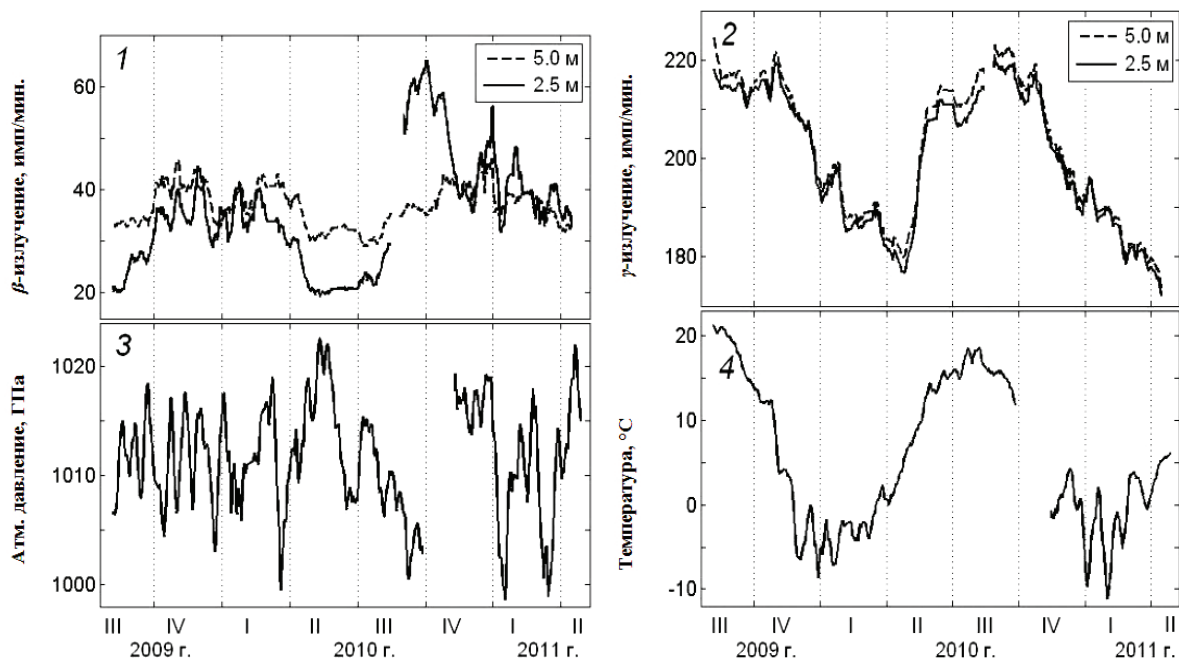


Рис. 5. Вариации компонент радиационного фона на серии высот приземной атмосферы в сейсмически активном регионе

Закключение

В результате многофакторного мониторинга в сейсмически спокойном регионе с резко континентальным климатом и в сейсмически активном районе с морским типом климата выявлены принципиальные отличия в согласованности вариаций β -, γ -излучений на временных интервалах от синоптического до годового:

- Наблюдается несогласованность временных вариаций уровней различных видов естественного ионизирующего излучения, поставлен вопрос о влиянии этого факта на окружающую среду.
- В приземной атмосфере сейсмически активного региона в вариациях β -фона существуют 2 максимума и 2 минимума

- Временная динамика радиационного фона в атмосфере сейсмически активного региона с морским климатом резко контрастирует как с поведением фона в том же регионе, так и с поведением излучений в сейсмически спокойном регионе с резко континентальным типом климата.

Таким образом, возникла новая проблема в исследовании естественного радиационного фона — анализ согласованности вариаций различных видов естественного ионизирующего излучения и изучение влияния этого обстоятельства на окружающую среду.

Выполнено при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» № 2.1.1/544 и проекта СО РАН № VII.63.1.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микляев П.С., Петрова Т.В. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // Аппаратура и новости радиационных измерений. — 2007. — Т. 66. — № 2. — С. 2–16.
2. Firstov P.P., Yakovleva V.S., Shirokov V.A., Rulenko O.P., Filipov Yu.A., Malysheva O.P. The nexus of soil radon and hydrogen dynamics and seismicity of the northern flank of the Kuril — Kamchatka subduction zone // Annals of Geophysics. — 2007. — V. 50. — № 4. — P. 283–291.
3. Фирстов П.П. Мониторинг объемной активности подпочвенного радона (^{222}Rn) на Паратунской гидротермальной системе в 1997–1998 гг. с целью поиска предвестников сильных землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. — 1999. — Т. 5. — № 6. — С. 33–43.
4. Уткин В.И. Газовое дыхание Земли // Соросовский образовательный журнал. — 1997. — Т. 2. — № 1. — С. 57–84.
5. Анисимов С.В., Мареев Е.А., Шихова Н.М. Механизмы связи аэроэлектрического и температурного полей в нижней атмосфере // Известия вузов. Сер. Радиофизика. — 2006. — Т. 49. — № 1. — С. 35–52.
6. Трахтенгерц В.Ю., Иудин И.Д. Актуальные проблемы электродинамики грозового облака // Известия вузов. Сер. Радиофизика. — 2005. — Т. 48. — № 9. — С. 810–821.
7. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Смирнов С.В. Изменчивость метеорологических и атмосферно-электрических величин в приземном слое атмосферы в предгрозовых ситуациях // Оптика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 22. — № 1. — С. 11–16.
8. Азбукин А.А., Богушевич А.А., Ильичевский В.С. и др. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорология и гидрология. — 2006. — Т. 1. — № 11. — С. 89–97.
9. Яковлева В.С., Ипполитов И.И., Кабанов М.В. и др. Скоординированный многофакторный эксперимент по анализу процессов поступления почвенного радона в приземный слой атмосферы // Аппаратура и новости радиационных измерений. — 2009. — Т. 67. — № 4. — С. 55–60.
10. Нагорский П.М., Ипполитов И.И., Смирнов С.В., Яковлева В.С. Влияние направления воздушного потока на динамику атмосферных полей бета- и гамма-излучений // Известия вузов. Сер. Физика. — 2010. — Т. 53. — № 11/2. — С. 51–54.
11. Нагорский П.М., Ипполитов И.И., Смирнов С.В. и др. Особенности мониторинга радиоактивности в системе «литосфера — атмосфера» по бета- и гамма-излучениям // Известия вузов. Сер. Физика. — 2010. — Т. 53. — № 11/2. — С. 55–59.

Поступила 05.05.2011 г.